

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

多重衝突パルス噴流に基づく圧縮自己着火
エンジン原理の数値解析・実験・理論的研究

Principle Study on the Compression
Combustion Engine Based on
Supermulti-jets Colliding with Pulse

申 請 者

小長谷	礼美
Remi	KONAGAYA

機械科学・航空宇宙専攻 熱流体科学・生命基礎研究

2020 年 5 月

大気中に放出される二酸化炭素量の大幅な削減が求められている．これに対し有効な手段のひとつは，各種動力エネルギー機械の熱効率を飛躍的に向上させることである．そのためには，燃焼室壁の冷却損失の大幅な低減と，燃焼騒音を従来レベルに維持したままでの高圧縮比化，ができれば良いことは，初等熱力学からも知られている．しかし，今まで，突破口がみつきにくかったこともあって，最近では，バッテリーを併用したハイブリッド化も，地上・航空の各用途で進められてきている．本研究は，燃焼室壁の冷却損失の大幅な低減と，燃焼騒音を従来レベルに維持したままでの高圧縮比化，を実現するために提案された多重衝突パルス噴流による圧縮原理の有効性を把握することを主たる目標としている．

この原理の根幹部分は論理的に単純明快であるが，繰り返して反応を起こす開放型のエンジンでは少なくとも，実用化に向けた利用がなされたことがないことが，特許からも明らかになっている．よって，実用化を目指すためには，やらなければならない研究課題は多い．また，燃焼室中央の自己着火開始部分とその周囲の圧力・温度等に大きな差異があるため，従来エンジンと比べて計測の難しさがあり，理論解析と数値解析を併用して進めることが，より重要となる．

本論文の構成を以下に記す．

第 1 部ではまず，地上用途と航空宇宙用途の従来エンジンと，一回のみの爆縮反応に関する過去の研究を調査し，本研究の意義と位置づけを明確にした．多重衝突パルス噴流はエンジンの燃焼室内だけではなく，多気筒の従来型レシプロエンジンの排気系集合部における圧力上昇度の理解の把握という意義もあることを見出した．更に，従来の熱流体力学の数値解析方法についても調査し，記した．

第 2 部では，多重衝突パルス噴流に基づく圧縮自己着火エンジン原理の非燃焼条件における理論・数値解析・衝撃波管実験を実施している．第一章では，多成分の非定常圧縮性流れの基礎方程式系と従来型の数値解析方法を記したうえで，第二章では，その基本的な数値解析を実施した．第三章では，局所的な誤差に関する数値解析の精度を高めつつ，しかも，解析領域全体の平均圧縮レベルの精度も同時に確保する補正方法を提示しながら，精度検証も行える方法を提示している．なお，補正方法というジャンルはいくつか存在しているが，局所的な補正法としては Level Set 法・TVD 法・人工粘性法等が存在し，解析領域全体と境界条件の整合性をとる形態の補正法としては，Miyakoda の方法や，Naitoh-Kuwahara の方法がある．この論文で提示したものは後者のジャンルに存するものであるが，新規性と有効性のあるものとなっている．特に，ppm レベルの未燃燃料のようなごく微量な物理量の精度改善は，Emissions 規制が強化されつづけている時代の要請に即したものともなっている．そして，この補正方法も加えて，多重衝突パルス噴流圧縮の数値解析を行った．第四章・第五章では，利用した衝撃波管の説明

と、それを用いた非燃焼実験の結果について述べている。なお、ある条件範囲においては、実験的に噴流衝突にある程度の外乱を加えても圧力上昇度はほとんど低下しなかったという重要な結果も得ている。第六章では、多重パルス噴流群の衝突による新しい圧縮自己着火エンジンの非燃焼状態において、三次元数値解析と実験を対比させながら、理論的な考察も加えて、パルス噴流群の衝突によって圧力が高まるメカニズムと、圧縮度合いと噴流本数等との関係を明らかにした。更に、第七章・第八章では、上記の補正法を含む数値解析方法を用いた検討も用いて、パルス噴流群衝突の安定性に関する力学的な考察を加えた。その結果、衝突噴流が亜音速の場合では、燃焼室初期圧力の約 18 倍、エンジンへ流入する気流の静圧の 7 倍以上の圧力上昇が衝突点付近で得られた。また、この圧力上昇度は、衝突噴流の速度を上げるか、燃焼室に対する噴流の流入面積の割合を大きくすること（噴流の本数を増やす等）によって、更に高まるという結果が得られた。

第 3 部では、多重衝突パルス噴流に基づく圧縮自己着火エンジンの基礎燃焼実験を行なっている。第一章では、第 2 部で行った衝撃波管試験で用いた燃焼室系に、燃料噴射系や制御系等を加えた実験装置の全体的な説明を行った。第二章では、始動時の燃焼実験結果について述べている。まず、壁面における温度と圧力、に加えて、排気温度について得られた計測結果は、大幅な空気断熱効果と、従来エンジンレベル以下の燃焼騒音を維持したままで、ある程度以上の中央部圧縮と自己着火を示唆する結果を示している。なお、多重衝突パルス噴流圧縮を用いない従来型のバーナーでは、壁温が上昇することも確認し、温度センサーとその設置が適切であることの裏づけデータも得た。更に、推力についても計測し、その壁圧力から試算した推力値と同等レベルの値を得た。これらの結果から、第 2 部で示した圧縮効果を、着火性という別の観点から確認することができたと言える。

第 4 部は、巨視的反応モデルを土台とした反応の急低下の予知理論を考案し、その数値計算も行ない、新たな視点からのメカニズム分析を示した。第一章では、巨視的な反応モデルについて説明している。これは、中間生成物を含む様々な分子種を、反応の加速因子と抑制因子の 2 種類に大別するという点で新規性がある。つまり、この 2 種類の分子の反応系を含む場合にのみ適用することができる。なお、これは特許の権利化も成されているという点でも、独自性を有するものである。第二章では、第一章で示した巨視的反応モデルを数値解析した際に見られる反応の急低下現象を説明する判別式を提示した。この巨視的反応モデルの数値解析結果は、かなりの範囲の条件では、ほぼ安定なカオス的な振動となるが、稀に示す不安定な反応の発生を、事前に予測する判別式である。さらに、第三章と第四章では、このモデルと、導出された不安定な反応の数学条件式を実際の系に適用し、2 つの実現象との対応が取れた。この巨視的反応モデルと判別式は、失火

に陥るメカニズムを分析するための新たな視点を提供している。また、半分以上の失火サイクルで、事前に予知できる可能性を見出し、今後の展望として記載している。なお、これは 6 本の連立常微分方程式の差分式を元にしたもので、計算量も少ないため、新たなモデル規範制御の方法の土台ともなりうる。

第 5 部は、結論を記して、本論文を総括している。

上記の本論文における成果の要点を以下に記す。多重衝突パルス噴流圧縮原理は、今まで、開放系で継続的に動力を取り出すシステムでは用いられていない圧縮方式ではあるが、圧縮すれば排熱を低減して高出力・高効率が可能になる、という熱力学の基本法則の範疇にはある現象である、よって、この圧縮レベルの把握は、この原理を応用していくうえで、最も重要な点である。そこで本論文では、衝撃波管内における非燃焼実験と数値解析を多用し、理論的な考察も加えることによって、その圧縮レベルについて解明を行なった。その結果、機械圧縮を追加し、始動時の補助点火装置を加えれば、期待する効果を得られる見通しを得た。そして、そのことを確認するための燃焼実験も行い、壁圧力、壁温度、排気温度、と推力を計測することによって、更なる確証を得ることができた。なお、この論文は、数値解析方法のジャンルのひとつとして重要な補正法というカテゴリにおいても貢献し、数値解析の信頼性向上にも寄与している。更に、展望として、燃焼安定度を高めるモデル規範制御方法の土台ともなり得る新たな方法も提示した。

以上、要するに、4 つの手法（数値解析、衝撃波管、エンジン、基礎反応論）を用いて、3 つの成果（非燃焼時の圧縮効果確認、燃焼実験による着火性確認、反応の急低下の新たな予測方法の提示）を得ている。地球温暖化が迫り、それに連動した問題が多発し始めている昨今、この実用化を目指すために、やらなければならない研究課題は多く、本論文は、それに対して多方面の切り口から、新たな糸口を複数、社会に提供している。その中で提示した方法は、複数の学術論文等を提示・公開などがされたことから評価を得たと言える。単純ではあるが、逆にその単純さが応用しやすいというメリットも生み出している。なお、それを元にして、多重衝突パルス噴流による圧縮レベルの定量化に寄与をしたことは、方法以上に重要である。

比較的低価格・軽量・耐久性の高い動力機械システムの進歩が望まれている。本論文は、この要望にも合致した「大幅な断熱＋低騒音型高圧縮比の新エンジン」の実用化にむけた重要な成果となっており、今後、エンジン分野と数値解析分野への貢献・寄与が期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏 名 小長谷 礼美 印

(2020 年 6 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
学術論文	<p>（主著論文：査読有）</p> <p>○Two prototype engines with colliding and compression of pulsed supermulti-jets through a focusing process, leading to nearly complete air insulation and relatively silent high compression for automobiles, motorcycles, aircrafts, and rockets. SAE Technical Paper, 2020-01-0837, pp. 1-31, 2020. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, T. Kobayashi, Y. Isshiki, H. Ito, H. Makimoto, Y. Kobayashi, Y. Tada, N. Kikuchi, A. Hosoi and Y. Fujii</p> <p>○Deterministic and stochastic computations of mysterious internal flows: based on a nonlinear local correction method with global conservativity. Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 51-70, 2020. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, H. Kijima</p> <p>○流体力学的物理量の局所の高精度 化と熱力学的量の全体積分保存性を両立する非線形補正法:単一成分流での基礎検証 とエンジンへの適用. 日本シミュレーション学会論文誌, 12 巻 2 号, pp. 38-48, 2020. <u>小長谷礼美</u>, 内藤健, 木嶋洋貴, 五十嵐大智</p> <p>○A macroscopic theory for predicting catastrophic phenomena in both biological and mechanical chemical reactions. Artificial Life and Robotics, Vol. 25, Issue 2, pp. 178-188, 2020. <u>R. Konagaya</u>, T. Takizawa, K. Naitoh</p> <p>○Experimental measurements and computations for clarifying nearly complete air-insulation obtained by the concept of supermulti-jets colliding with pulsation. SAE Technical Paper, 2017-01-1030, pp. 1-12, 2017. <u>R. Konagaya</u>, S. Oyanagi, T. Kanase, J. Tsuchiya, K. Ayukawa, K. Kinoshita, J. Mikoda, H. Fujita and K. Naitoh</p> <p>○Prognostic medication: for predicting premonition and recovery. Artificial Life and Robotics, Vol. 22, No. 4, pp. 449-456, 2017. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, K. Suzuki and H. Takashima</p> <p>○Unsteady three-dimensional computations of the penetration length and mixing process of various single high-speed gas jets for engines. SAE Technical Paper, 2017-01-0817, pp. 1-18, 2017. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, K. Tsuru, Y. Takagi and Y. Mihara</p> <p>（主著論文：査読審査のある国際講演会論文）</p> <p>○Nonlinearly-corrected Large Eddy Simulation for accurately evaluating both thermal efficiency and pollutant emissions in various types of engines and reactors. Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10), ICCFD10-094, pp. 1-11, 2018. <u>R. Konagaya</u> and K. Naitoh</p> <p>○High Compression and Nearly complete Air insulation Obtained for a New Rocket Engine Based on the Pulsed Supermulti-jets Colliding. Proceedings of 32nd International Symposium on Shock Waves, OR-04-0175, pp. 1-6, 2019. <u>R. Konagaya</u>, T. Kobayashi, J. Mikoda, K. Kinoshita, S. Kawaguchi, H. Makimoto, Y. Kobayashi, S. Shinoda, S. Lujiang, and K. Naitoh</p> <p>（共著論文：査読のある学術雑誌）</p> <p>○Unsteady three-dimensional computations and experiments of compression flow formed by collision of supermulti-jets. JSME Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 13, No. 1, pp. 1-23, 2018. K. Tsuru, <u>R. Konagaya</u>, S. Kawaguchi and K. Naitoh</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
学術論文 (つづき)	<p>○Computations and Experiments for Clarifying Compression Level and Stability of Colliding Pulsed Supermulti-Jets in a Piston-Less Single-Point Autoignition Engine. SAE Technical Paper, 2016-01-2331, pp. 1-12, 2016. K. Naitoh, J. Tsuchiya, D. Ikoma, T. Nakai, S. Oyanagi, T. Kanase, T. Okamoto, Y. Tanaka, K. Ayukawa and <u>R. Konagaya</u></p> <p>Computational Optimization of Pressure Wave Reflection on the Piston Surface for Single Point Autoignition Gasoline Engine with Colliding Pulsed Supermulti-Jets Leading to Noiseless-High Compression and Nearly-Complete Air-Insulation. SAE Technical Paper, 2019-01-0235, pp. 1-9, 2019. A. Hosoi, <u>R. Konagaya</u>, S. Kawaguchi, Y. Sogabe, Y. Yamashita, and K. Naitoh</p> <p>Fundamental Experimental Tests toward Future Cold Fusion Engine Based on Point-compression due to Supermulti-jets Colliding with Pulse (Fusine). Journal of Condensed Matter Nuclear Science, Vol. 24, pp. 236-243, 2017. K. Naitoh, J. Tsuchiya, K. Ayukawa, S. Oyanagi, T. Kanase, K. Tsuru and <u>R. Konagaya</u></p>
講演	<p>（主著者：軽微な査読のある国際講演会論文）</p> <p>Nonlinear-correction method for computational fluid dynamics: leading to accurate evaluation of all fluid-dynamic instability, thermal efficiency, and pollutant emissions in engines and reactors. The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Miyazaki, Japan, 2019-11. <u>R. Konagaya</u> and K. Naitoh</p> <p>Unsteady three-dimensional computation and shock-tube experiment revealing the level of focusing compression by pulsed supermulti-jets colliding. The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Miyazaki, Japan, 2019-11. <u>R. Konagaya</u> and K. Naitoh</p> <p>Silent Strong Compression, Nearly-Complete Air-Insulation, and High Thrust Repeatedly Obtained by Pulsed Rocket Engine Based on Colliding Supermulti-jets. AIAA Propulsion & Energy Forum 2019, Indianapolis, USA, 2019-8. <u>R. Konagaya</u>, S. Kawaguchi, J. Mikoda, K. Kinoshita, H. Makimoto, Y. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Tada, S. Lujiang, and K. Naitoh</p> <p>Unsteady three-dimensional computations and shock tube experiments of the compression principle of supermulti jets colliding with pulse. AIAA Propulsion & Energy Forum 2018, Cincinnati, USA, 2018-7. <u>R. Konagaya</u>, T. Kobayashi, K. Naitoh, Y. Tanaka, K. Tsuru, K. Kinoshita, J. Mikoda, K. Ashikawa, H. Makimoto, Y. Kobayashi, S. Lujiang, S. Shinoda</p> <p>Computations of a New Hydrogen-Oxygen Rocket Engine Based on Supermulti-jets Colliding with Pulse. 2017 AIAA SciTech Forum, Grapevine, USA, 2017-1. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, T. Okamoto, K. Tsuru</p> <p>（登壇）</p> <p>Development of weak cold-fusion engine (Fusine) assisted by molecular chemical reaction: based on double focusing-compression over 1,000 bar and 7,000 K due to pulsed supermulti-jets colliding. 22nd International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-22), Assisi, Italy, 2019-9. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, T. Kobayashi, Y. Kobayashi, H. Makimoto, Y. Naridomi, Y. Wake</p> <p>Supercomputer simulation and experiment clarifying the maximum level of focusing compression due to pulsed supermulti-jets colliding: in weak cold-fusion engine (Fusine). 22nd International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-22), Assisi, Italy, 2019-9. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (つづき)	<p>多重衝突パルス噴流圧縮エンジンの数値解析・基礎実験研究：形状・諸元が圧縮度合に与える影響. The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, 宮崎, 2019-11. <u>小長谷礼美</u>, 内藤健</p> <p>多重衝突パルス噴流圧縮原理を用いたロケットエンジンの中心圧力に関する実験・数値解析・理論の統合研究. 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 福岡, 2018-10. <u>小長谷礼美</u>, 小林知嵩, 三小田純也, 榎本大輝, 小林祥輝, 石緑江, 篠田創太, 内藤健</p> <p>Computations of a New Rocket Engine Based on Supermulti-jets Colliding with Pulse. 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 新潟, 2017-10. <u>小長谷礼美</u>, 川口 颯太, 鶴 航太, 内藤 健</p> <p>Prognostic theory for predicting premonition of catastrophic phenomena. International Workshop on Artificial Life and Robotics, Busan, Korea, 2017-9. <u>R. Konagaya</u>, Y. Machida, K. Naitoh</p> <p>Large eddy simulation of the penetration length and mixing process of high speed hydrogen gas jets for various operating conditions of engines. 2017 JSAE Annual Congress (Spring), Yokohama, Japan, 2017-5. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, Y. Takagi, Y. Mihara</p> <p>Computation of a New Rocket Engine Using a New Compressive Combustion Principle Based on the Supermulti-jets Colliding with Pulse. The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2016), Toyama, Japan, 2016-10. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, T. Okamoto, K. Tsuru</p> <p>Computation of Turbulent Mixing Process of Single High-Speed Hydrogen Jets. The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2016), Toyama, Japan, 2016-10. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh, T. Okamoto, K. Tsuru, Y. Takagi, Y. Mihara</p> <p>Prognostic medication: for predicting premonition, recovery, lifespan, life pattern, and polymorphism. The First International Symposium on BioComplexity 2016 (AROB・ISBC1 2016), Beppu, Japan, 2016-1. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh</p> <p>Prediction of death and apparent death: Mathematical conditions derived from the six equation model. The 34th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST 2015), Toyama, Japan, 2015-10. <u>R. Konagaya</u>, K. Naitoh</p>
その他	<p>2018 年 3 月 日本機械学会 三浦賞 受賞</p> <p>2019 年 7 月 32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32) における Student Competition Award (International Shock Wave Institute) 受賞</p> <p>2020 年 3 月 JXTG エネルギー優秀賞 受賞</p> <p>2020 年 3 月 早稲田大学第 9 期アーリーバード若手研究者奨励賞（優秀賞）受賞</p> <p>2020 年 4 月 日本シミュレーション学会主催 International Conference on Simulation Technology (JSST2019)において Outstanding Presentation Award 受賞</p> <p>日本学術振興会 特別研究員 課題番号 18J22401 (DC1 : 2018 年 4 月～2021 年 3 月) 採択</p> <p>早稲田大学 理工学術院総合研究所 アーリーバードプログラム (2019 年度) 採択</p> <p>早稲田大学 理工学術院総合研究所 JXTG 若手研究者奨励 (2019 年度) 採択</p>